

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630049

研究課題名(和文) マイクロスケールにおける水分子の流動特性の解明

研究課題名(英文) Investigation on flow characteristics of water molecules in microscale

研究代表者

山口 浩樹 (Yamaguchi, Hiroki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50432240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気体としての水分子、つまり水蒸気のマイクロスケールにおける流動特性を解明することを目指した。マイクロ流路を通過する流量を実験的に計測し、気体分子と固体表面の相互作用の強さを表すパラメータである接線方向運動量適応係数を導出した。その結果、水分子は単原子分子気体とは異なる性質を示すことを明らかにした。また混合ガスの影響についても調査を行い、気体の混合によって流動特性が大きく変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, the flow characteristics of water molecules in the micro-scale flow field was investigated. The mass flow rate through a micro channel was experimentally measured and the tangential momentum accommodation coefficient, which represents the gas-surface interaction, was extracted. The result indicated that water molecules have different characteristics from monatomic noble gases. The effect of gas mixture was also investigated and it was clarified that the flow characteristics are affected by the molar ratio of the mixture.

研究分野：分子流体力学

キーワード：マイクロ気体流れ マイクロ流路 適応係数 水

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー源の一つとして燃料電池が着目されている。特にその一種である固体高分子型燃料電池では水を生成する化学反応によって電気エネルギーを得ており、水分子の挙動がその性能に大きな影響を与えることから、水分子のマイクロ流路内における流動に対する知見が重要である。特に、液体の水だけではなく水蒸気、つまり気体としての水分子の燃料電池内部における挙動に関する知見も不可欠である。また、燃料電池内部においては多孔質体も利用されており、その内部はマイクロスケールの流動場となることから、水分子のマイクロスケールにおける挙動の把握は重要であり、特に実験的解析も必須である。しかし、水は標準状態では液体であるため、気体としての水分子の性質についてはほとんど研究されておらず、さらにマイクロスケールにおける分子の挙動に関する実験的研究自体もあまり進められていない。

また、水分子と固体表面との相互作用は、マイクロテクノロジーの進展に伴って開発が進んでいるマイクロデバイスにおいても非常に重要な知見である。水分子は極性分子でもあり、その結果として固体表面と強く相互作用することが知られている。例えば、真空工学の分野においては、容器を超高真空環境にしても水分子が容器内部表面に吸着して残留することが知られている。そのため、マイクロデバイスを大気中で利用する際にも表面に水分子が吸着することが容易に想像でき、その結果としてマイクロデバイスの性能において水分子と固体表面との相互作用が影響することも懸念される。

このようにマイクロスケールにおける水分子の流動の知見は、産業的には特に渴望されている。しかし、標準状態では液体であるために、水蒸気、つまり気体としての水に対して実験的に計測することは非常に難しい。例えば、水蒸気を計測機器に導入するためのポンプや計測機器において水蒸気が凝縮して液化してしまうと、機器に大きなダメージを与えることもある。特に液体である水は通常、導電性を持つため、電気的な機器には非常に悪影響を与える。そのため、水蒸気量が適切な量となるようにコントロールすることが必要となり、さらには液化しないように適切な実験系を設計しなければならない。このように実験的計測には大きなリスクが伴うため、現在までほとんど行われて来ていない。さらにその上、マイクロスケールでの計測においては、その計測すべき物理量が非常に小さくなり、既存の計測機器をそのまま利用するだけでは一般的に感度が不足してしまい、計測が非常に困難となることが容易に想像できる。また、スケールの小ささから、計測手法の選択にも大きな制約がある。そのため、マイクロスケールにおける水分子に対する計測は非常に困難である。

2. 研究の目的

本研究では、気体としての水分子、つまり水蒸気がマイクロ流路を通過する流量を計測することで、マイクロスケールにおける水分子の流動特性を実験的に解明することを目指した。具体的には、密閉された二つの容器をマイクロ流路で接続し、二つの容器に圧力差を付けてマイクロ流路内に圧力駆動流れを生じさせ、同時に容器内の圧力の時間変化を記録することにより、マイクロ流路内を通過する流量を計測する定体積法を利用する。マイクロ流路を通過する流量は非常に小さいため、直接計測するのではなく、容器の圧力の時間変化として間接的に計測する。この実験的に計測した流量と解析的に求められる流量とを比較することにより、水分子と固体表面との相互作用についての特性を明らかにする。さらに、気体分子の分子同士の衝突間の平均的な距離である平均自由行程が系のスケールに対して無視できなくなる高クヌッセン数流れ領域を用いることで、衝突による分子の平均的な接線方向の速度変化を意味する接線方向運動量適応係数 (TMAC) を導出する。この TMAC を用いることによって流動抵抗の大きさを明らかにできるだけでなく、既に広く計測されている他の気体分子種との比較を行い、水分子の持つ特性を詳しく明らかにすることも可能となる。これまでに利用されている試料気体は不活性な単原子分子気体や窒素や酸素などに限られていることから、極性や多原子分子における内部自由度の影響などについての解明ができると考えられる。その結果、高クヌッセン数流れの研究分野において活発に議論されている TMAC の持つ特性に対する理解も大幅に進展することも期待できる。

3. 研究の方法

現在、現有のマイクロ気体流れの流量計測システムは、常温で気体である試料気体をガスボンベから供給することによって計測する構成となっている。そこで、まずは気体としての水である水蒸気を流量計測システムへ供給するためのシステムを構築する。真空容器に水を入れ、容器中の空気及び水中に溶解している気体を除去し、飽和蒸気圧によって水蒸気のみを供給できるようにする。ただ、供給している水蒸気の純度が流量計測においては重要となるため、現有の質量分析計を用いて供給する気体の成分分析を実施し、供給気体の中における水蒸気の割合を確認する。供給気体中の水分子の割合がほぼ 100% とみなせる場合には、直接その気体を計測システムに供給することによって、水分子のマイクロ流路を通過する流量を計測することが可能となる。

供給する水蒸気の純度が十分でないことも想定される。その場合、流量の計測結果は混合気体に対する結果となる。しかし、気体分子種ごとに固体表面との相互作用は大き

く異なることが知られており、他の気体が混入することで結果は大きく左右してしまい、純粋な水分子としての知見とは言えなくなってしまう可能性がある。そこで、マイクロスケールにおける混合気体の流動解析も併せて試みる。ここでは、組成が既知である二種類の気体の混合気体をガスボンベより導入して計測を実施し、それぞれの気体単体で行った計測と比較しながら、組成の情報を用いることでそれぞれの成分の流量を抽出することが可能かどうかを検討する。気体種としては、取り扱いやすく、単体の知見が豊富にあり、かつ気体種間の特性が大きく異なり特性を分離しやすいと考えられる単原子気体のヘリウムとアルゴンを用いる。特にこれらの気体は混合することによってそれぞれの気体分子と固体表面との相互作用に変化があるとは考え難く、単純な重ね合わせとなることが想定されるが、これまで十分な知見があるわけではないため、慎重に検討する。場合によっては数値解析の専門家などとの議論も行い、混合気体の計測において明らかとなった問題を解決していく。その後、他の分子種に対する計測も検討するとともに、TMACの導出方法についても検討を行う。また、大気中の水分子は容器内にも必ず残ってしまうことから、容器内に残っている水分子による影響が問題となることも考えられる。計測において大きな問題が発生する場合には、水分子として重水(D₂O)を供給することにより、残留水分子との区別を試みる。

以上の検討を行った上で、最後にマイクロスケールにおける水分子の流動特性の解明に取り組む。流量や流動抵抗の大きさを計測するだけでなく、TMACを導出することによって他の気体分子種との特性の比較も行う。そして、極性や多原子分子における内部自由度の影響についても議論し、水分子がマイクロスケールにおいて示す流動特性について詳細に解明することも試みる。更に可能であれば、相互作用における固体表面の影響を明らかにするために、マイクロ流路の材質を変更しながら計測を実施する。金属とガラスや高分子などの非金属材料、親水性と疎水性など、様々な性質によって水分子と固体表面間の相互作用の大きさに影響がある可能性が考えられるため、できるだけ広い特性を持つ材質に対して計測することによって、固体表面の影響を比較検討する。

4. 研究成果

本研究では、気体としての水分子、つまり水蒸気のマイクロスケールにおける流動特性を解明することを目指した。さらに、マイクロ流路を通過する流量が気体分子と固体表面との相互作用に強く依存する高クヌッセン数流れとなる領域を利用して、相互作用の強さを表すパラメータである TMAC を導出することで、水分子の固体表面近傍における挙動を解明していくことを目指した。また、

固体表面の影響を明らかにするために、マイクロ流路表面の材質を変更して計測を行い、結果を比較検討することを試みた。

現有のマイクロ流路内の流量計測システムに対して気体として水分子を供給できるシステムを構築した。具体的には、温度管理された真空容器に液体の水を封入し、容器内や水に溶存している気体を除去した上で気体として水分子のみを供給できるように真空ポンプによって十分な真空度に到達するまで排気した後真空ポンプを切り離し、飽和蒸気圧によって容器内から出てくる水分子を供給できるようにした。供給される気体において水以外の残留ガスや大気の混入の存在を確認するために質量分析計を用いて成分分析を行ったところ、気体はほぼ水のみとみなせることを確認した。そのため、そのまま水分子の流量計測を実施した。

次に、金属やプラスチックなど様々なマイクロ流路を用いた流量計測を行い、流路材料によって TMAC、つまり流れやすさが異なることを明らかにした。また、導出した TMAC を、単原子分子気体であるヘリウム、ほぼ同じ質量を持つネオン、そしてアルゴンと比較した。その結果、単原子分子気体が示す傾向とは少し異なり、TMAC、つまり流路内の流れやすさが単原子分子とは異なる性質を示すことを明らかにした。

最後に、非常に微量でも水分子以外の気体が混入して混合ガスとなることによって結果が受ける影響に関して検討した。簡単のため、質量の大きく異なるヘリウムとアルゴンの混合ガスにおいて、混合比を変えたときの影響を計測した。混合ガスにおいては TMAC に相当する粘性滑り係数を求めたが、混合比によって大きく変化することが明らかとなった。そのため、気体の混入は計測結果を大きく左右することが判明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

馬淵修, 山口浩樹, 村木秀行, 松田佑, 新美智秀, マイクロ流路を利用した TMAC の計測, 2014 年度日本機械学会年次大会, 2014 年 9 月 7 日-10 日, 東京電機大学, 東京.

高森研輔, 山口浩樹, 馬淵修, 松田佑, 新美智秀, マイクロ流路を通過する水分子の質量流量の計測, 2015 年度日本機械学会年次大会, 2015 年 9 月 13 日-16 日, 北海道大学, 北海道.

H. Yamaguchi, O. Mabuchi, K. Takamori, Y. Matsuda, T. Niimi, Flow Rate Measurement of Water Vapor through Microtubes, 2nd European Conference on Non-equilibrium Gas Flows, 2015 年 12 月 9 日-11 日, Eindhoven, Netherlands.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

山口 浩樹 (YAMAGUCHI HIROKI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50432240